

Sistem Pengereman Regeneratif pada Kendaraan Listrik berbasis *Field Oriented Control* (FOC)

Zakiah Amalia¹, Achsanul Khabib², Erni Yudaningtyas³, Talifatim Machfuroh¹, Siti
Duratun Nasiqiati Rosady¹, and Fica Aida Nadhifatul Aini¹

e-mail: zakiah_amalia@polinema.ac.id, achsanul.khabib@polinema.ac.id, erni@ub.ac.id,
talifatim.machfuroh@polinema.ac.id, sitiduratun@polinema.ac.id, fica.aida@polinema.ac.id

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

³Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Jalan MT. Haryono No.167 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 10 Juni 2025

Direvisi 30 Juli 2025

Diterbitkan 31 Juli 2025

Kata kunci:

BLDC
Pengereman Regeneratif
Field Oriented Control

Keywords:

BLDC
Regenerative Braking
Field Oriented Control

ABSTRAK

Sebagian besar kendaraan listrik menggunakan sistem pengereman regeneratif untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang disimpan kembali ke baterai. Namun, efektivitas sistem ini masih dapat ditingkatkan. Penelitian ini mengusulkan sistem pengereman gabungan antara rem regeneratif dan mekanis, dengan kontrol intensitas menggunakan nilai variabel dari ADC (*Analog to Digital Converter*). Motor BLDC 250 watt dimodifikasi agar dapat berfungsi sebagai generator selama pengereman. Sistem dikendalikan menggunakan algoritma *Field-Oriented Control* (FOC) yang memungkinkan pembalikan arah medan magnet stator, menciptakan torsi pengereman. Konverter digunakan untuk mengatur intensitas rem regeneratif selama deselerasi. Pengujian dilakukan secara real-time di lintasan jalan untuk mengukur energi yang dipulihkan selama pengereman. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem ini mampu mengembalikan energi sebesar 11,7% dari total energi yang dikonsumsi selama akselerasi. Sistem pengereman gabungan dengan kontrol FOC dan ADC variabel ini mampu meningkatkan efisiensi energi dan memberikan pengereman yang lebih efektif pada kendaraan listrik. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keselamatan, tetapi juga memperpanjang umur baterai dan komponen mekanis.

ABSTRACT

Most electric vehicles use a regenerative braking system to convert kinetic energy into electrical energy that is stored back into the battery. However, the effectiveness of this system can still be improved. This study proposes a combined braking system between regenerative and mechanical brakes, with intensity control using a variable value from an ADC (Analog to Digital Converter). A 250-watt BLDC motor is modified to function as a generator during braking. The system is controlled using a Field-Oriented Control (FOC) algorithm that allows the reversal of the stator magnetic field direction, creating braking torque. A converter is used to regulate the intensity of the regenerative brakes during deceleration. Tests were conducted in real-time on a road track to measure the energy output during braking. The results showed that the system was able to recover 11.7% of the total energy consumed during acceleration. This combined braking system with variable FOC and ADC control can improve energy efficiency and provide more effective braking in electric vehicles. This approach not only improves safety but also extends the lifespan of the battery and mechanical components.



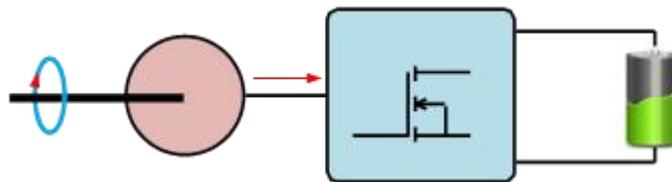
Penulis Korespondensi:

Zakiah Amalia
Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno Hatta No.9, Malang, 65141
Email: zakiah_amalia@polinema.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +6285258729682

1. PENDAHULUAN

Sebagian besar desain kendaraan listrik menggabungkan pengereman regeneratif, yang mengubah energi yang hilang selama pengereman kembali ke baterai. Beberapa penelitian telah mengeksplorasi berbagai pendekatan untuk teknologi ini [1, 2]. Beberapa penelitian berfokus pada evaluasi dan pengujian fungsionalitas sistem pengereman regeneratif [3], meskipun masih ada ruang untuk perbaikan dan modifikasi. Penulis mengusulkan mekanisme pengereman yang memanfaatkan Konverter Analog-ke-Digital (ADC) variabel untuk mengontrol intensitas pengereman. Sistem ini dimaksudkan untuk memperlambat atau menghentikan kendaraan yang bergerak. Lebih lanjut, penulis menyarankan untuk menggabungkan pengereman mekanis dan regeneratif untuk mengoptimalkan kinerja secara keseluruhan, karena hanya mengandalkan pengereman regeneratif mungkin tidak menghentikan kendaraan sepenuhnya secara efektif.

Sistem pengereman regeneratif adalah mekanisme pengereman elektrik yang memperlambat kendaraan sambil memulihkan energi kinetik selama pengereman. Tidak seperti sistem pengereman konvensional, di mana energi dihamburkan sebagai panas, pengereman regeneratif mengubah energi ini menjadi energi listrik, yang dapat digunakan untuk mengisi ulang baterai kendaraan, sehingga memperluas jangkauan berkendarnya. Faktor-faktor kunci yang memengaruhi kinerja pengereman regeneratif meliputi kecepatan putar sumber gerak, daya masukan ke generator, dan daya keluaran yang dihasilkan. Faktor-faktor ini secara signifikan memengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan. Diagram blok sistem pengereman regeneratif ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Diagram blok sistem pengereman pada mesin BLDC tipe hub.

Sistem pengereman regeneratif mengubah energi kinetik kendaraan menjadi energi listrik, yang ditransfer ke baterai melalui motor hub BLDC yang dikendalikan oleh konverter. Konverter ini mengatur intensitas pengereman selama deselerasi. Pada sistem pengereman konvensional, pengereman terjadi ketika tuas rem ditarik atau pedal ditekan, yang menyebabkan bantalan rem menjepit rotor roda. Proses ini mengubah energi mekanik menjadi energi panas, yang menyebabkan inefisiensi. Ketika diterapkan pada sepeda motor listrik, sistem pengereman tersebut menjadi kurang efektif. Oleh karena itu, sistem pengereman regeneratif digunakan pada sepeda motor listrik untuk meningkatkan efisiensi dengan memulihkan dan menyimpan energi selama pengereman.

Studi ini mengusulkan sistem pengereman terintegrasi untuk kendaraan listrik menggunakan metode *Field-Oriented Control* (FOC) untuk mengoptimalkan kinerja pengereman dan daya tahan mekanis. Tidak seperti algoritma FOC konvensional [4], sistem pengereman dalam penelitian ini membalikkan gaya medan magnet pada kumparan stator BLDC dari mode berkendara ke mode pengereman [5]. Mekanisme pengereman ini, yang umum digunakan pada sistem tugas berat, memungkinkan kendaraan untuk melakukan deselerasi dengan cepat ketika inersia tinggi. Dalam praktiknya, aksi pengereman menyebabkan motor listrik menghasilkan torsi ke arah yang berlawanan. Ketika motor BLDC menerima sinyal pengereman, torsi rotor terbalik dihasilkan dengan mengubah arah arus melalui



MOSFET. Studi ini memberikan penjelasan teoretis tentang sistem pengereman regeneratif, yang didukung oleh validasi eksperimental.

2. METODE PENELITIAN

Field Oriented Control (FOC) adalah jenis metode kontrol vektor yang digunakan untuk mengatur torsi dan fluks dalam koordinat d dan q motor BLDC. Teknik kontrol ini melibatkan penentuan perbedaan sudut antara medan magnet rotor dan medan magnet stator. Jika sudut antara kedua medan ini menyimpang dari 90 derajat, terjadi offset fasa antara back-EMF dan arus, yang menyebabkan penurunan efisiensi. Untuk mengatasi masalah ini, pengontrol FOC menyesuaikan logika kontrol untuk mempertahankan sudut 90 derajat antara medan, memastikan bahwa torsi yang dihasilkan oleh motor BLDC dimaksimalkan [6, 7, 8, 9]. Keuntungan utama pengontrol FOC meliputi pengurangan getaran motor yang disebabkan oleh pengalihan PWM dan peningkatan efisiensi motor dengan mengoptimalkan konsumsi daya [10]. Jika sudut medan magnet rotor dapat dideteksi secara akurat, maka dimungkinkan untuk menghasilkan medan magnet berputar yang mempertahankan pemisahan 90° dari medan magnet rotor. Sudut 90 derajat ini memastikan produksi torsi yang maksimal.

Field Oriented Control (FOC) mencapai hal ini dengan mengoperasikan motor pada torsi penuh sambil terus memantau posisi sudut rotor. Sistem kemudian menyesuaikan tegangan tiga fase untuk memastikan GGL balik pada jangkar tetap berjarak 90 derajat dari fluks rotor. Metode ini sederhana yaitu dengan mengukur posisi sudut rotor dan menambahkan 90°, tegangan tiga fase dapat dihitung untuk mempertahankan perbedaan fase 90 derajat yang diperlukan.

Algoritma *Field Oriented Control* (FOC) menghasilkan vektor tegangan tiga fasa untuk mengatur arus stator tiga fasa. Dengan mengubah arus fisik menjadi kerangka acuan yang berputar, komponen torsi dan fluks menjadi invarian terhadap waktu. Transformasi ini memungkinkan penggunaan teknik kontrol konvensional, seperti pengontrol Proporsional-Integral (PI), yang serupa dengan yang digunakan pada motor DC.

Pada motor DC brushed, fluks stator dan fluks rotor dipertahankan pada sudut 90 derajat satu sama lain, yang menghasilkan produksi torsi maksimum. Teknik *Field Oriented Control* (FOC) juga mengubah arus motor menjadi vektor dua sumbu, analog dengan pendekatan yang digunakan pada motor DC. Prosesnya dimulai dengan mengukur motor tiga fasa.

2.1 Spesifikasi Peralatan

Untuk mendukung infrastruktur sistem pengereman regeneratif, diperlukan perangkat keras tambahan berupa unit sepeda listrik yang menggunakan motor BLDC. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, rangka yang digunakan dirancang khusus untuk mendukung sistem pengereman regeneratif. Rangka ini dipilih berdasarkan kriteria bahan yang kaku untuk memastikan keamanan dan kenyamanan berkendara tetap terjaga.



Gambar 2. Perancangan Rangka Motor

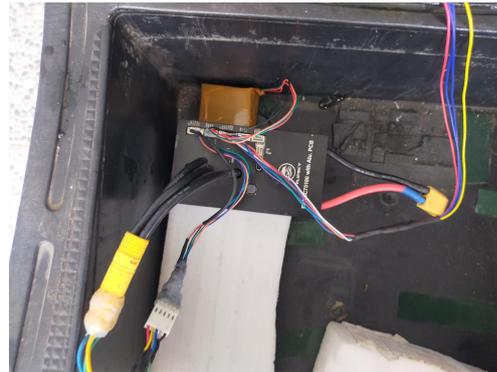
Dalam penelitian ini spesifikasi rangka dan motor BLDC adalah seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.



TABEL I : SPESIFIKASI KENDARAAN Uji

Parameter	Spesifikasi
Daya BLDC	350 Watt (Dengan Tegangan 48 Volt)
Berat Total Unit	30 Kg
Jenis Kontroler	FOC (Flipsky)
Baterai	48 Volt, 15 Ah
Berat Pengendara	70 Kg

Dalam Sistem kendaraan listrik, komponen lain yang penting adalah Kontroler BLDC, kontroler ini yang mengatur berapa daya yang ditranmisikan ke motor. Gambar 3 menunjukkan kontroler yang dipakai dalam penelitian ini.



Gambar 3. Kontroler FOC

Spesifikasi kontroler FOC yang dipakai ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL 2: SPESIFIKASI KONTROLER

Parameter	Spesifikasi
Size	103X58X24mm
Voltage	14-84V (4-20S)
Continuous Current	100A
Peak Current	250A
Firmware	5.02; firmware upgrade
Modes	DC, BLDC, FOC (sinusoidal)
Control Interface Ports	USB, CAN, UART
Supported Sensors	ABI, HALL, AS5047, AS5048A
Input Set Support	PPM, ADC, NRF, UART
Wire Size	12AWG
Programmable	Yes
Regenerative Capacity	Yes
Power Switch Button	Red

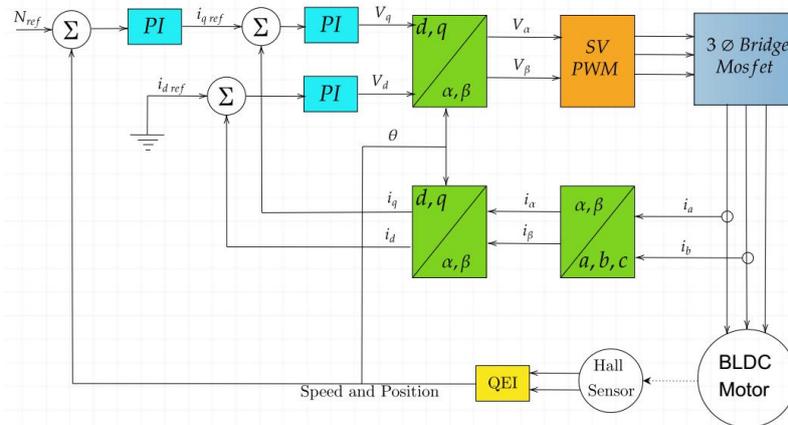
Penelitian ini mengembangkan model sepeda motor listrik yang memanfaatkan sistem pengereman regeneratif untuk menangkap energi inersia saat menutup throttle, tujuannya adalah mengisi baterai dan mengurangi penggunaan rem mekanis. Dalam penelitian ini, sistem pengereman dikendalikan menggunakan algoritma FOC, yang merupakan jenis kontrol umpan balik dengan cara mengatur medan flux pada motor. Teknik kontrol ini melibatkan perhitungan perbedaan sudut antara medan magnet rotor dan medan magnet stator. Jika sudut antara kedua medan magnet ini tidak sembilan puluh derajat, akan timbul offset sudut antara Back-EMF dan arus. Offset fase ini dapat mengurangi efisiensi. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan kontroler FOC untuk mengatur pembangkitan torsi sesuai dengan sinus θ dengan menyesuaikan logika kontrol



pada sudut pergantian menjadi 90^0 , sehingga torsi yang dihasilkan oleh motor BLDC dapat mencapai nilai maksimal. Kontroler FOC memiliki keunggulan dalam mengurangi getaran yang dihasilkan motor akibat penggunaan PWM switching, serta meningkatkan efisiensi konsumsi daya motor.

FOC beroperasi dengan menggerakkan motor dengan torsi maksimal dan memantau posisi sudut rotor. Selanjutnya, sistem ini mengatur tegangan tiga fasa sehingga Back-EMF pada jangkar selalu tetap 90^0 terpisah dari fluks rotor. Metode FOC ini relatif sederhana, hanya memerlukan pengukuran posisi sudut rotor dan menambahkan 90^0 dalam perhitungan tegangan tiga fasa, menggunakan persamaan yang sesuai untuk menghasilkan perbedaan fase 90^0 .

Proses algoritma FOC digambarkan dalam diagram blok yang mencakup transformasi koordinat, iterasi PI, transformasi kembali, dan pembangkitan PWM. Diagram blok ini juga menunjukkan fungsi-fungsi yang diperlukan untuk kontrol FOC. Sinyal kesalahan dari i_d, i_q , dan nilai referensi digunakan untuk mengatur Referensi i_d yang mengontrol fluks magnetisasi rotor. Vektor fluks harus sejajar dengan kutub magnet rotor agar motor dapat menghasilkan torsi maksimum, yang dicapai dengan mengatur referensi fluks menjadi nol. Perlu diperhatikan bahwa i_d dan i_q mewakili torsi dan fluks, di mana referensi i_q mengatur output torsi motor. Keluaran dari pengontrol PI berupa V_d dan V_q , yang merupakan vektor tegangan yang diteruskan ke motor BLDC. Sudut transformasi koordinat yang baru dihitung berdasarkan kecepatan motor, konstanta waktu pada tegangan rotor, serta i_d dan i_q . Algoritma FOC ini dapat dilihat pada gambar 4.

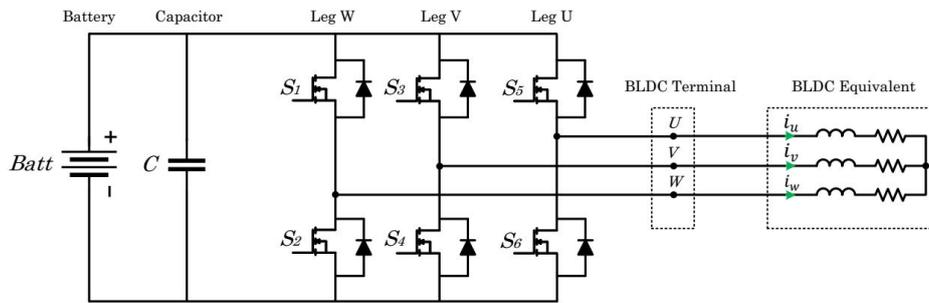


Gambar 4. Blok Diagram FOC

FOC bekerja dengan mengatur sudut baru untuk menentukan posisi vektor tegangan berikutnya, yang menghasilkan torsi yang diperlukan untuk mempertahankan perputaran rotor. Output V_d dan V_q dari pengontrol PI kemudian diputar kembali ke kerangka referensi stasioner menggunakan sudut baru ini. Proses ini menghasilkan nilai tegangan kuadratur v_α dan v_β . Selanjutnya, nilai v_α dan v_β ditransformasikan kembali menjadi nilai tiga fasa V_a, V_b dan V_c . Nilai tegangan tiga fasa ini digunakan untuk menghitung siklus nilai PWM baru, yang menghasilkan vektor tegangan yang diinginkan. Sudut transformasi θ dan kecepatan motor diperoleh dari sensor hall yang terpasang pada poros motor.

Topologi inverter ditunjukkan pada gambar 5. Di sini, V_{batt} adalah sumber tegangan yang dihubungkan dengan kapasitor C. Terdapat enam MOSFET dengan dioda body. Konfigurasi ini disederhanakan untuk memahami cara kerja SVPWM. Ada enam vektor dasar yang mewakili perubahan sumber tegangan yang disuplai ke motor BLDC hub. Secara keseluruhan, terdapat 8 status di mana I bergerak dari $V_0 (000) \rightarrow V_1 (001) \rightarrow V_2 (011) \rightarrow V_3 (010) \rightarrow V_4 (110) \rightarrow V_5 (100) \rightarrow V_6 (101) \rightarrow V_7 (111)$, dengan variasi tegangan kombinasi 0, $-V_s$, dan V_s pada V_{uv}, V_{vw} , dan V_{wu} .





Gambar 5. Topologi Daya Inverter 3 Phase

Untuk mengetahui posisi referensi rotor d-q diketahui dengan cara:

$$\frac{d}{dt} I_d = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \omega_r \frac{L_q}{L_d} I_q + V_d$$

$$\frac{d}{dt} I_q = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \omega_r \frac{L_d}{L_q} I_d - \frac{1}{L_q} \phi_f \omega_r + V_q$$

Sehingga,

$$\phi_d = L_d I_d + \phi_f \cdot \phi_q = L_q I_q$$

dimana L_q and L_d adalah induktansi pada d-axis dan q-axis, Sedangkan I_d dan I_q adalah arus stator, P adalah jumlah kutub, f adalah mutual flux menghasilkan magnet, R_s adalah resistansi stator, V_d and V_q adalah tegangan d dan q-axis, sedangkan L_s induktansi diri. Torsi elektromagnetik dituliskan dengan persamaan:

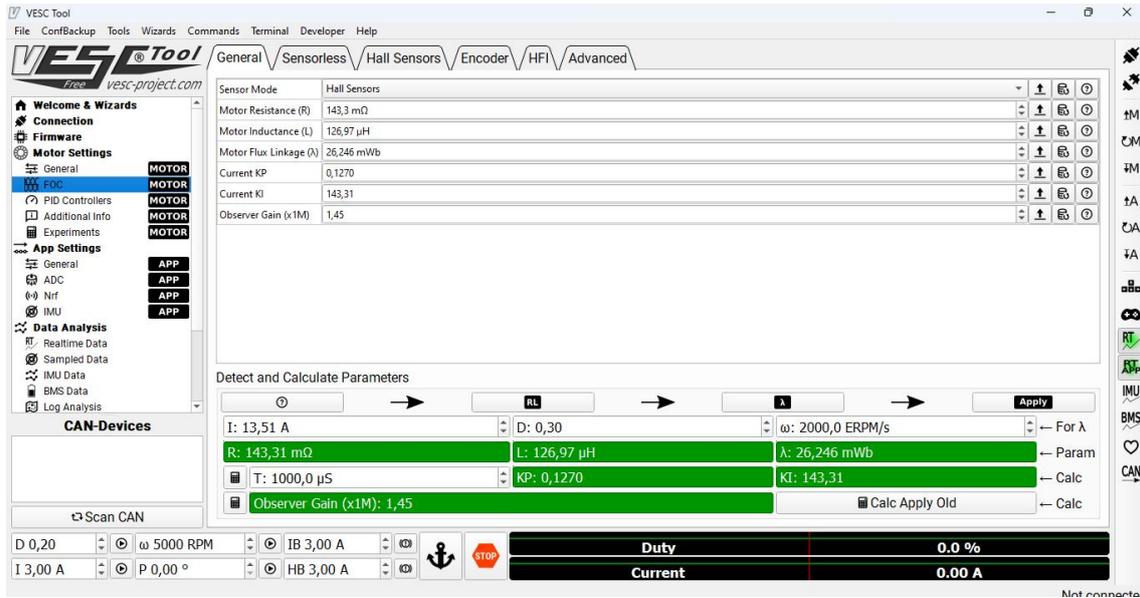
$$T_e = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \phi_f]$$

dalam persamaan tersebut jika $I_d = 0$, maka flux pada d-axis adalah tetap, maka torsi elektromagnetik T_m ditentukan dengan persamaan:

$$T_m = \frac{3}{2} P \phi_f I_d$$

Vektor arus dihasilkan pada FOC-axis dan fluks rotor dihasilkan hanya pada sumbu q. Hal ini mampu mencapai torsi maksimal karena torsi yang dihasilkan oleh motor berbanding lurus dengan arus sumbu q dimana fluks rotor sumbu d tetap konstan. Dengan fitur ini torsi elektromagnetik tidak hanya digunakan dalam menggerakkan motor, tetapi untuk mewujudkan fungsi braking untuk meminimalkan riak torsi pada komutasi. Parameter-parameter diatas dapat di implementasikan ke dalam sistem dengan cara setting auto pada software interface VESC seperti yang terlihat pada Gambar 6.





Gambar 6. Setting FOC untuk Motor BLDC

Untuk desain sistem pengereman, dilakukan dengan cara membalik delapan status perputaran SVPWM ke desain driver motor untuk beralih dari $V7(111) \rightarrow V6(101) \rightarrow V5(100) \rightarrow V4(110) \rightarrow V3(010) \rightarrow V2(011) \rightarrow V1(001) \rightarrow V0(000)$ dengan kombinasi tegangan $0, -V_s$ dan V_s diberikan ke V_{uv}, V_{vw} dan V_{wu} . Hal ini memungkinkan untuk mengontrol putaran motor dengan menetapkan kerangka acuan ke kuantitas pengereman secara variabel. Pengumpulan data dilakukan dengan metode eksperimental dimana sistem pengereman regeneratif diuji coba langsung di jalan sesungguhnya. Adapun langkah langkah metode pengumpulan data dijelaskan sebagai berikut:

1. Menentukan rute yang akan dilalui saat melakukan pengujian menggunakan google map
2. Menghubungkan HP android yang sudah terinstal aplikasi VESC dengan controller yang sudah dipasang pada kendaraan listrik melalui komunikasi bluetooth.
3. Mengaktifkan fitur data logging pada aplikasi VESC.
4. Menjalankan kendaraan listrik pada rute yang telah ditentukan sebelumnya. Lakukan pengereman untuk mendapatkan data.
5. Setelah penyelesaian rute, maka data dari proses logging dapat diambil di HP. Data masih berupa CSV file.
6. Melakukan penyaringan dan pengolahan data yang diperlukan melalui software Excel.
7. Mengambil data kondisi awal dan kondisi akhir untuk mendapatkan pengaruh pengereman regeneratif terhadap pengisian baterai sesuai dengan Tabel 3.

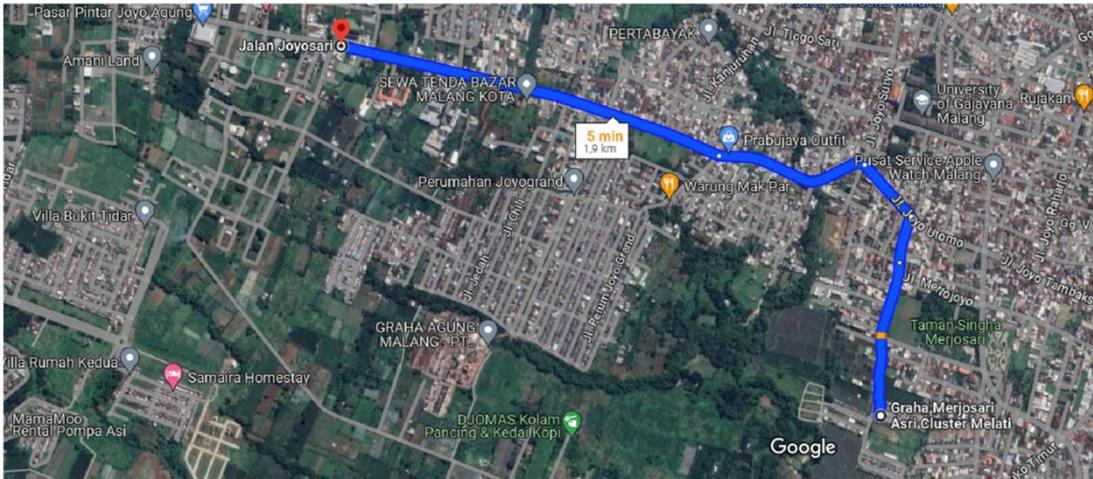
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian system pengereman reneratif pada kendaraan listrik ini memerlukan beberapa agar mendapatkan hasil yang optimal sesuai dengan perencanaan. Tahapan tersebut antara lain sebagai berikut:

3.1 Rute Pengujian

Untuk membuktikan sistem pengereman regenerative ini, diperlukan pengujian langsung di jalan. Gambar 7 menunjukkan rute jalan yang dipakai dalam pengujian ini.





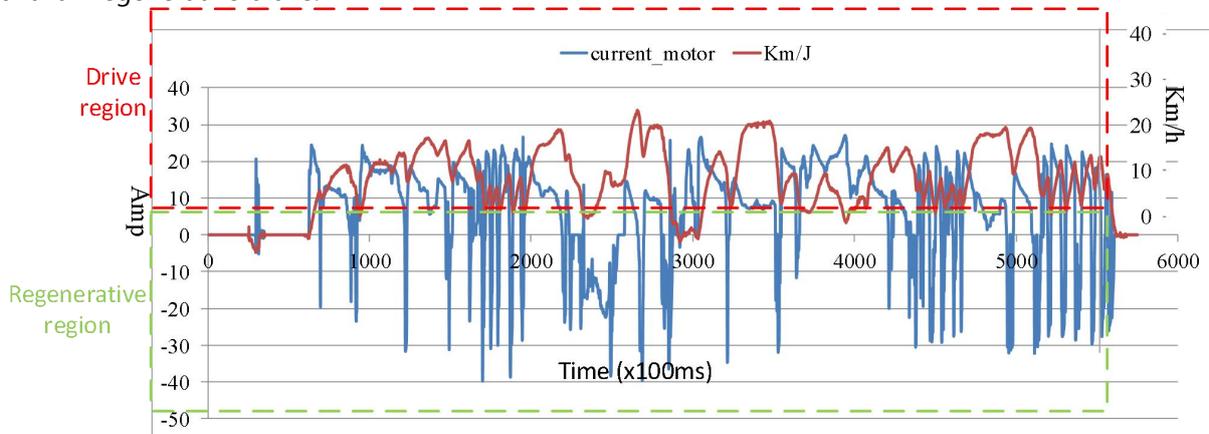
Gambar 7. Sistem pembakaran 2 langkah

TABEL 3: JARAK DAN WAKTU TEMPUH PENGUJIAN

Parameter	Spesifikasi
Jarak Tempuh	2 x 1,9 Km
Waktu Tempuh	10 Menit (600000 ms)

3.2 Pengujian Sistem Pengereman

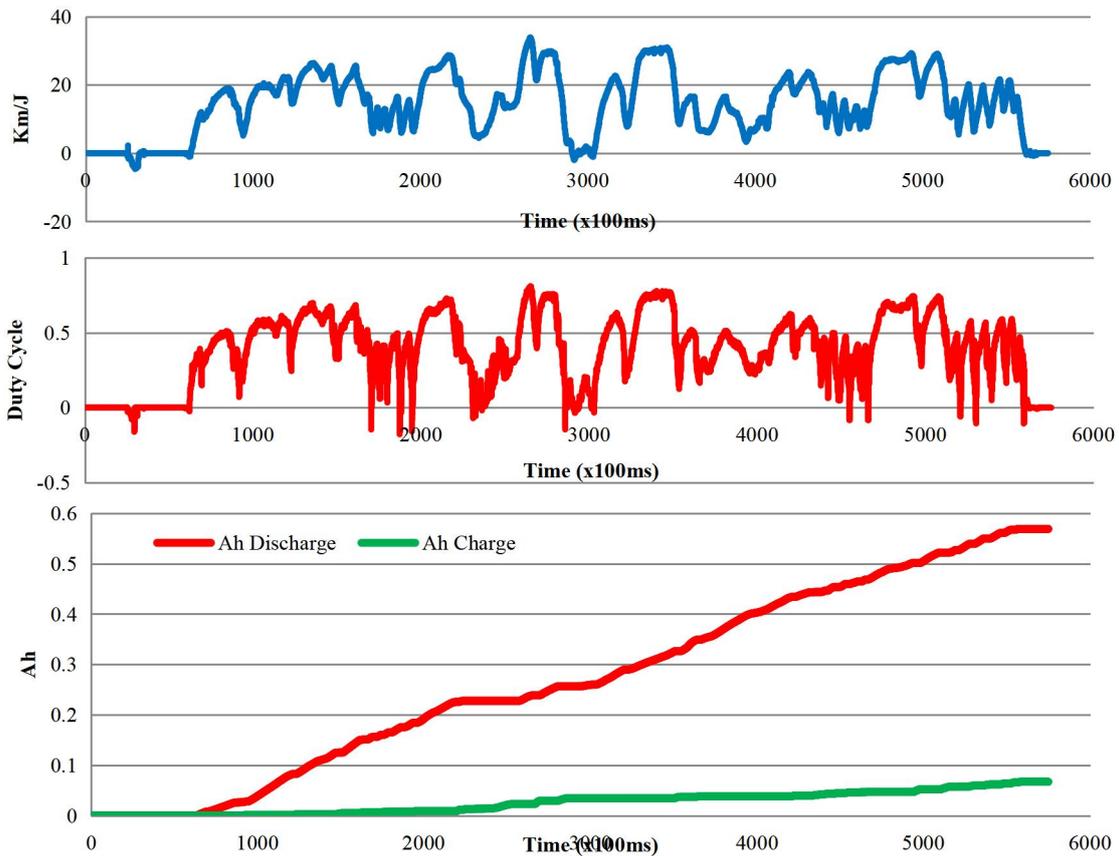
Gambar 8 menunjukkan arus regeneratif saat pengujian. Drive region menunjukkan arus saat akselerasi, sedangkan regenerative region menunjukkan arus balik saat melakukan pengereman. Regenerative region membuktikan bahwa ada arus yang bernilai negatif (Arus balik) pada saat deselerasi. Arus balik ini yang disimpan kembali dalam baterai sehingga jarak tempuh kendaraan listrik menjadi lebih jauh dibandingkan tanpa menggunakan regenerative brake.



Gambar 8. Grafik kecepatan dan arus saat pengujian

Gambar 9 menunjukkan arus regeneratif saat pengujian. Drive region menunjukkan arus saat akselerasi, sedangkan regenerative region menunjukkan arus balik saat melakukan pengereman. Regenerative region membuktikan bahwa ada arus yang bernilai negatif (Arus balik) pada saat deselerasi. Arus balik ini yang disimpan kembali dalam baterai sehingga jarak tempuh kendaraan listrik menjadi lebih jauh dibandingkan tanpa menggunakan regenerative brake.





Gambar 9. Grafik Kecepatan, Duty Cycle dan Ah saat pengujian

Gambar 9 menunjukkan adanya energi yang dihasilkan saat melakukan pengereman yang direpresentasikan dalam satu Ah. Untuk lebih jelas berapa jumlah energi yang dihasilkan dari proses pengereman, lihat Tabel 4.

TABEL 4: DATA HASIL PENGARUH Pengereman REGENERATIF

No	Parameter	Kondisi Awal	Kondisi akhir
1	Tegangan Battery (V)	53,7 Volt	52,9 Volt
2	Ah Draw (mAh)	0 mAh	569 mAh
3	Ah Charge (mAh)	0 mAh	67,1 mAh
4	Wh Draw (Wh)	0 Wh	30,1 Wh
5	Wh Charge (Wh)	0 Wh	3,5 Wh
6	Jarak (Meter)	0 Km	3,8 Km
7	Waktu Tempuh	0	10 Menit (600000 ms)

Dalam penelitian ini, pengambilan data dilakukan dengan cara logging data secara realtime ketika kendaraan listrik dijalankan di jalan raya dari pengujian diperoleh data energi total yang diperoleh saat pengereman adalah 3,5 Wh, Sedangkan energi yang dibutuhkan saat driving sebesar 30,1 Wh. Dari pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa energi yang diperoleh dari proses pengereman adalah 11,7 % dari energi yang dihabiskan untuk akselerasi.

4. KESIMPULAN

Sebagian besar kendaraan listrik saat ini menggunakan sistem pengereman konvensional, seperti kampas rem yang terpasang pada cakram roda. Namun, metode tradisional ini kurang ideal untuk kendaraan listrik karena inefisiensinya. Sebagai gantinya, sistem pengereman regeneratif umum digunakan, yang mengubah energi yang



hilang selama pengereman menjadi energi listrik untuk mengisi ulang baterai. Dalam studi ini, kami mengintegrasikan sistem pengereman regeneratif dengan sistem pengereman listrik lainnya, memanfaatkan variabel baru yang diperoleh dari menarik tuas rem. Tujuannya adalah untuk meningkatkan keselamatan dan kenyamanan bagi pengemudi sepeda motor listrik. Kami menerapkan sistem pengereman regeneratif yang memanfaatkan algoritma *Field-Oriented Control* (FOC). Sistem FOC menawarkan keunggulan seperti riak minimal, kebisingan rendah, dan efisiensi tinggi dibandingkan metode lain. Selain itu, skema pengereman FOC terbalik memberikan respons yang memuaskan baik pada kecepatan tinggi maupun rendah. Keunggulan ini berkontribusi pada peningkatan kendali selama pengoperasian kendaraan listrik dan peningkatan penghematan energi. Energi yang dipulihkan dari pengereman adalah 11,7% dari energi yang dikonsumsi selama akselerasi. Percobaan dilakukan di jalan dengan pencatatan data waktu nyata untuk mengukur energi yang diperoleh dari proses pengereman, menggunakan motor BLDC 250 watt yang dimodifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Tzortzis, A. Amargianos, S. Piperidis, E. Koutroulis, and N. C. Tsoouveloudis, "Development of a compact regenerative braking system for electric vehicles," in 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). IEEE, jun 2015.
- [2] R. E. Hellmund, "Regenerative braking of electric vehicles," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. XXXVI, pp. 1–78, jan 1917.
- [3] M. Gupta, "Evaluation of regenerative braking and its functionality in electric vehicles," in 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET). IEEE, jun 2020.
- [4] F. Genduso, R. Miceli, C. Rando, and G. R. Galluzzo, "Back EMF sensorless-control algorithm for high-dynamic performance PMSM," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 6, pp. 2092–2100, jun 2010.
- [5] J. Jiang and J. Holtz, "An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, pp. 1299–1307, 2001.
- [6] E. Yesilbag and L. T. Ergene, "Field oriented control of permanent magnet synchronous motors used in washers," in 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. IEEE, sep 2014.
- [7] F. Yusivar, N. Hidayat, R. Gunawan, and A. Halim, "Implementation of field oriented control for permanent magnet synchronous motor," in 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS). IEEE, nov 2014.
- [8] A. Saghafinia, H. Ping, and M. Uddin, "Sensored field oriented control of a robust induction motor drive using a novel boundary layer fuzzy controller," Sensors, vol. 13, no. 12, pp. 17 025–17 056, dec 2013.
- [9] S.-M. Liu, C.-H. Tu, C.-L. Lin, and V.-T. Liu, "Field-oriented driving/braking control for electric vehicles," Electronics, vol. 9, no. 9, p. 1484, sep 2020.
- [10] F. Golesorkhie, F. Yang, L. Vlacic, and G. Tansley, "Field oriented control-based reduction of the vibration and power consumption of a blood pump," Energies, vol. 13, no. 15, p. 3907, jul 2020.

